

导流器对射流式自吸离心泵自吸性能的影响*

刘建瑞 文海罡 向宏杰 郭晨旭 高振军

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 在射流式自吸离心泵的叶轮出口处增设新型导流器, 该导流器具有两个不对称出口及隔流板, 隔流板与叶轮间隙为 1.0 mm。基于 Fluent 软件提供的 Mixture 多相流模型、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型及 SIMPLE 算法, 对该泵的自吸过程进行了非定常数值模拟, 得到了泵内压力、速度和气液两相分布及导流器两个出口的压力、气相体积流率和液相质量流率随时间步长的变化规律。结果表明: 导流器内压力沿流体流动方向逐渐增大, 并出现较大的变化梯度, 叶轮各流道内的压力近似对称分布; 导流器两个不对称出口气液混合物的各个流动参数呈规律的周期性变化; 导流器上的隔流板与叶轮的间隙在泵自吸过程中不仅能阻止液体环流, 减少水力损失, 而且使泵加速气液的混合及分离, 从而缩短泵的自吸时间。

关键词: 自吸离心泵 导流器 隔流板 自吸性能 数值模拟

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0043-05

Effects of Diffuser on Self-priming Performance of Flow-ejecting Self-priming Centrifugal Pump

Liu Jianrui Wen Haigang Xiang Hongjie Guo Chenxu Gao Zhenjun

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A type of diffuser which had two asymmetrical exits and a separating flow board was placed at the inlet of the impeller of flow-ejecting self-priming centrifugal pump. The gap between the separating flow board and the impeller was 1.0 mm. Based on Mixture multiphase flow model, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and SIMPLE algorithm, unsteady numerical simulation of the self-priming process was carried out by using Fluent software. The distributions of pressure, velocity and gas-liquid phases field inside the pump, and also the changing regularity of pressure, gas phase volume flow rate and liquid mass flow rate on the two exits of the diffuser with the change of timestep were obtained. The results show that the pressure in the diffuser gradually increases along the direction of flow and appears larger change gradient, the pressure inside the each runner of the impeller approximate symmetric distribution. The flow parameters appear periodic change on the two asymmetrical exits of the diffuser. The gap between the separating flow board and impeller have not only prevented the formation of circulation of the fluid, reducing hydraulic loss and improving the efficiency of the pump, but also quicken the mixing of the gas-liquid near the gap, shortening the self-priming time of the pump.

Key words: Self-priming centrifugal pump Diffuser Separating flow board Self-priming performance Numerical simulation

引言

自吸离心泵的设计不仅要考虑普通离心泵的性能,

还要考虑其自吸性能, 在结构设计上比普通离心泵复杂。目前还没有准确有效地缩短自吸离心泵自吸时间的设计方法, 以往对自吸性能的研究大多采

用试验方法,较少涉及自吸机理及气液两相流的研究^[1]。

自吸离心泵自吸过程是气液两相流输送过程,其内部流场较为复杂,而且影响自吸离心泵自吸性能的因素较多。近年来随着计算流体力学和相应计算软件的发展,自吸离心泵的三维数值模拟已成可能,也出现了相关报道^[2-8]。本文针对射流式自吸离心泵自吸性能存在的问题,设计一种新型导流器,并采用数值模拟的方法对其自吸性能进行研究,以达到改进设计的目的。

1 模型泵基本结构和参数

如图1所示,改进的新型导流器有两个出口,出口1及出口2,在出口2处设置隔流板结构,隔流板外缘与叶轮的间隙为1.0 mm,以提高泵的自吸性能^[9]。该射流式自吸离心泵基本参数为: $Q = 18 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 35 \text{ m}$,转速 $n = 3\,600 \text{ r}/\text{min}$,比转数 $n_s = 65$ 。

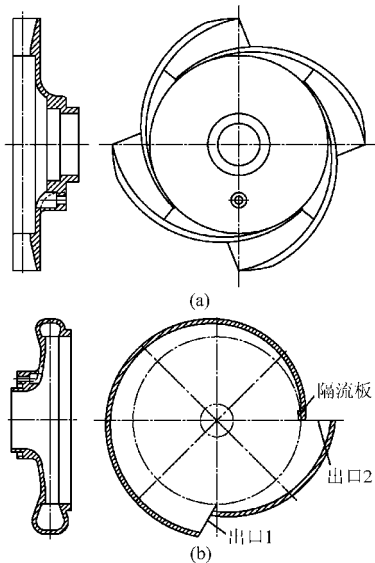


图1 导流器示意图

Fig.1 Schematic of diffuser

(a) 对称出口导流器 (b) 不对称出口导流器

试验按国家标准 GB/T 3216—2005《回转动力泵 水力性能验收试验 1级和2级》及机械行业标准 JB/T 6664.3—2004《自吸泵 第3部分:自吸性能试验方法》进行。结果表明,当自吸高度为5 m时,自吸时间为45 s,远高于国家标准规定的自吸高度5 m时自吸时间小于等于120 s。而相同基本参数下带对称出口导流器的射流式自吸离心泵,自吸高度为5 m时,自吸时间为55 s。从而可以看出带新型导流器射流式自吸离心泵在自吸性能上有突出的优势,所以有必要研究该新型导流器对自吸性能的影响,完善其设计理论及方法,从而为设计出性能更好

的自吸泵提高参考。

2 数值模拟

采用 Pro/E 三维造型软件对计算域进行三维全流场建模如图2所示。

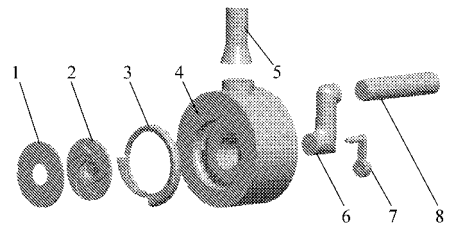


图2 计算域三维造型

Fig.2 3-D modeling of computational domain

1. 后腔 2. 叶轮 3. 导流器 4. 泵体 5. 出水管 6. S弯管
7. 回流阀 8. 进口管

由于计算区域结构复杂,因此采用对复杂模型适应度强的非结构化四面体网格对其进行网格划分。为分析网格数目对模拟误差的影响,对该自吸泵在回流阀关闭情况下的计算域进行了5种不同最小网格尺寸的网格划分后进行网格无关性分析,结果如表1所示。从表1可以看出,在最小网格尺寸小于1.2 mm(即网格数大于1 654 564)后,随着网格数目的增加,数值模拟得到的扬程和效率的变化较为稳定,对网格的相关性很小。再综合考虑计算机的配置,选取最小网格尺寸1.2 mm来进行网格划分并进行后续的研究。

表1 网格无关性分析

Tab.1 Independence analysis of grid

最小网格尺寸/mm	网格数目	效率/%	扬程/m
0.8	2 763 105	55.587 4	36.612 6
1.0	2 018 572	55.581 8	36.593 7
1.2	1 654 564	55.563 7	36.561 8
1.4	1 076 932	54.316 1	36.542 7
1.6	695 106	54.362 9	36.316 0

采用 Fluent 软件,选择 Mixture 多相流模型和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。为了节省资源并快速获得稳定的数值解,计算时将该泵自吸过程定常数值模拟得到的流场作为非定常数值模拟的初始流场。

近年来,虽然已有学者采用 PISO 算法求解非定常流动,但二者在实际非定常流动问题(特别是两相流流场)求解中的差别并不清晰^[10],所以本文计算的每个时间步长上仍应用 SIMPLE 方法求解离散方程。

计算时先将进水管以下泵体区域预装水,采用速度进口边界条件,进口处气相体积分数设置为1。

根据 Courant number 公式^[11]

$$C = |V| \Delta t / \Delta x \leq 50$$

式中 V ——估计平均速度, m/s

Δt ——时间步长, s

Δx ——最小网格尺寸, m

计算得出时间步长的最大值为 $2.2736 \times 10^{-3} s$, 综合考虑选取时间步长为 $2.3148 \times 10^{-4} s$ (即 $1/72$ 叶轮旋转周期), 迭代子步为 150, 总时间步长为 432 步。在第 144 个步长 (叶轮第 2 个旋转周期) 后模拟所得到的导流器出口平均压力随时间步长出现了规则的周期性变化, 说明此时计算收敛。选择第 360 步至 432 步 (叶轮第 6 个旋转周期) 为该非定常模拟分析区间。

3 气液两相流流场分析

3.1 压力场

图 3 所示为导流器和叶轮中间位置横截面压力分布云图。导流器内压力沿流动方向逐渐增大, 出口附近区域为高压区, 流体流入导流器过程中, 动能不断转换为压力能, 其中伴随着能量损失, 压力出现较大的变化梯度, 叶轮各流道内的压力近似对称分布。靠近导流器出口处的压力较大, 而远离导流器出口处的压力明显要小。最小压力在叶轮进口处, 压力随着半径的增大逐渐增大, 同一半径下叶片工作面的压力大于背面。

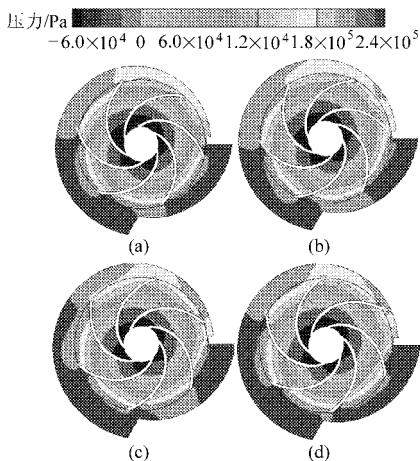


图 3 压力分布云图

Fig. 3 Pressure contours

(a) 第 360 步 (b) 第 375 步 (c) 第 390 步 (d) 第 405 步

3.2 速度场

导流器和叶轮中间位置横截面速度分布云图如图 4 所示。叶轮流道内, 速度随着半径的增大不断增大, 同一时刻, 不同的流道速度分布不同, 靠近导流器出口的流道速度较低, 这主要是由于在导流器出口存在较大的压力梯度, 混合物由叶轮出口进入导流器时压力增大。一方面导流器上隔流板与叶轮之间的间隙起到阻止液体在导流器内形成环流的作用,

将导流器设计为两个出口, 可以减少水力损失 (图 4); 另一方面, 隔流板周围气液混合物的速度较大, 叶片背面出现速度极大值区域, 叶片在通过隔流板附近区域时气液混合物的流速加快, 所以隔流板处与叶轮的间隙利于自吸过程中气液的混合, 缩短了自吸时间。

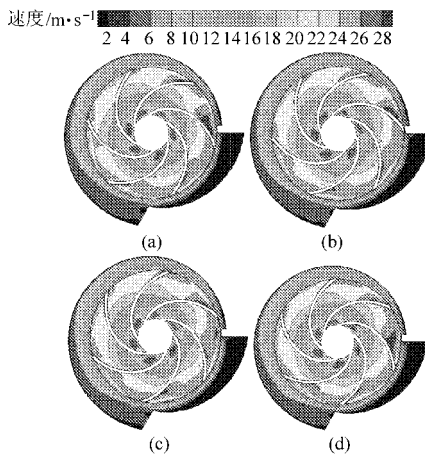


图 4 速度分布云图

Fig. 4 Speed contours

(a) 第 360 步 (b) 第 375 步 (c) 第 390 步 (d) 第 405 步

3.3 气相分布

图 5 为非定常计算得到的导流器和叶轮中间位置横截面内的气相分布云图。叶轮流道内在靠近叶片工作面的局部区域气相体积分数较大, 而叶片工作面气相体积分数则较小, 同一流道内, 气相分布由叶片工作面向叶片背面呈一定梯度的变化。不同时间步长下, 气相的分布规律大体一致, 同一体积分数的区域有微小的变化, 导流器出口的气相体积分数略微增大。

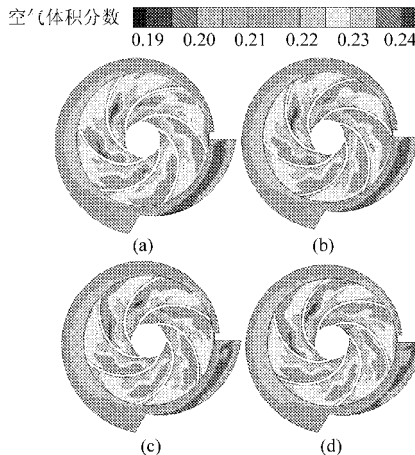


图 5 空气体积分数分布云图

Fig. 5 Air volume fraction contours

(a) 第 360 步 (b) 第 375 步 (c) 第 390 步 (d) 第 405 步

4 内部流动随时间步变化的规律分析

为探索自吸过程中导流器内气液混合物的流动

情况,监测了导流器2个出口的压力、气相体积流率及液相的质量流率随时间步长的变化情况。

图6、图7、图8分别为导流器出口1及出口2处的静压、气相体积流率及液相质量流率随时间步长的变化曲线。如图6所示,在一个周期内,导流器出口的压力均出现规律性的变化,即在一个周期内出现6次波动,叶片通过周期是压力周期变化的最小单位,叶轮旋转一周包含6个这样的周期,这6个周期的变化规律相同但压力的绝对值并不相同。

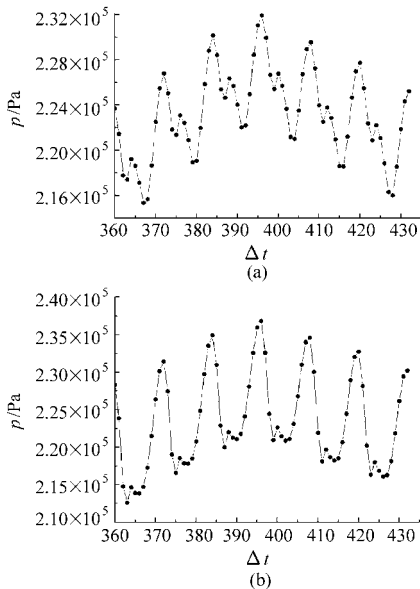


图6 压力随时间步长的变化(一个周期内)

Fig. 6 Curves of pressure vs time step (one cycle)

(a) 导流器出口1 (b) 导流器出口2

如图7、图8所示,导流器2个出口的流动情况有明显的差别,随时间步长的变化,导流器出口1处气相体积流率和液相的质量流率增大而导流器出口2处则减小。随时间步长的增加,导流器出口液相质量流率及气相的体积流率均呈正弦变化,同时伴随规律性的增减。

5 结论

(1)流场分析显示,导流器内压力沿流体流动方向逐渐增大,并出现较大的变化梯度,叶轮各流道内的压力近似对称分布。

(2)导流器上的隔流板与叶轮的间隙在泵自吸过程中起到阻止液体环流,减少水力损失以提高泵

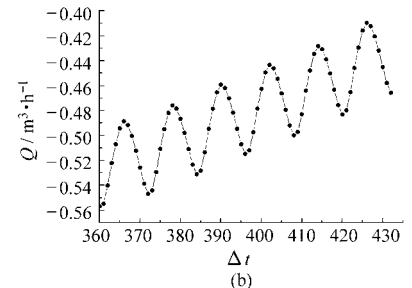
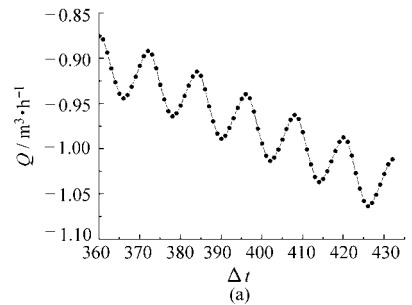


图7 气相体积流率随时间步长的变化

Fig. 7 Curves of gas flow rate vs time step

(a) 导流器出口1 (b) 导流器出口2

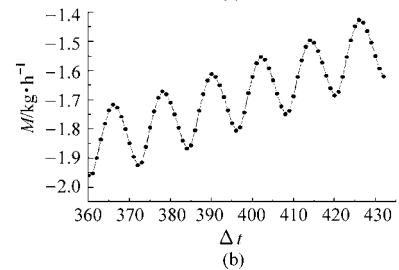
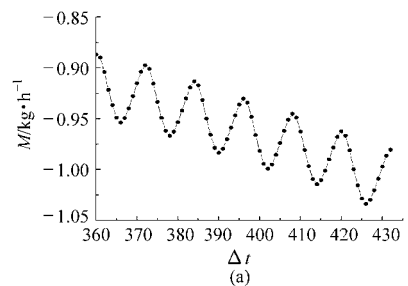


图8 液相质量流率随时间步长的变化

Fig. 8 Curves of liquid mass flow rate vs time step

(a) 导流器出口1 (b) 导流器出口2

的效率,而且使泵加速气液的混合及分离,有利于泵的自吸性能提高,而缩短自吸时间。

(3)导流器的2个不对称出口气液混合物的流动参数各自呈现规律的周期性变化。导流器出口1的气相体积流量与液相质量流量随时间步长的变化情况同步,而导流器出口2的情况则相反。

参 考 文 献

- 吕智君,兰才有,王福军. 自吸泵研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械,2005,23(3):1~4.
Lü Zhijun, Lan Caiyou, Wang Fujun. The present status and development of self-priming pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(3): 1~4. (in Chinese)
- 李文广. 气泡在外混式自吸泵内运动的简单数值模拟[J]. 甘肃工业大学学报,1991,17(4):15~19.
Li Wenguang. Simple numerical simulation of air bubbles motion in self-priming centrifugal pumps with outer recirculation[J].

- Journal of Gansu University of Technology, 1991, 17(4): 15 ~ 19. (in Chinese)
- 3 赵雪华, 徐语, 雷桥. 立式自吸泵输气性能的理论及试验研究[J]. 华东理工大学学报, 1996, 22(4): 455 ~ 461.
Zhao Xuehua, Xu Yu, Lei Qiao. Theoretical and experimental research on characteristics of vertical self-priming pump[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1996, 22(4): 455 ~ 461. (in Chinese)
 - 4 李红, 王涛. 自吸泵内部流场的数值模拟及性能预测[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3): 194 ~ 197.
Li Hong, Wang Tao. Numerical simulation of interior flow and performance prediction for self-priming pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 194 ~ 197. (in Chinese)
 - 5 王春林, 丁剑, 史亚婷, 等. 旋流自吸泵突台结构数值模拟及对性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(6): 474 ~ 478.
Wang Chunlin, Ding Jian, Shi Yating, et al. Numerical simulation of boss structure and its impact on rotational flow self-priming pump performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6): 474 ~ 478. (in Chinese)
 - 6 施卫东, 叶忠明, 刘建瑞. 一种新型射流式自吸泵进口流场的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 50 ~ 52.
Shi Weidong, Ye Zhongming, Liu Jianrui. Numerical simulation of inlet flow of new-jetted self-priming pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 50 ~ 52. (in Chinese)
 - 7 Huang Si, Xue Dunsong. Three-dimensional calculation of gas-oil two-phase flow in helicon-axial booster-pump impeller[C] // Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Thermophysics, 1999: 674 ~ 679.
 - 8 Muggli Felix A, Holbein Peter, Dupont Philippe. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoff to maximum flow[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 798 ~ 802.
 - 9 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 宇航出版社, 2010.
 - 10 王彤, 谷传刚, 杨波, 等. 非定常流动的 PISO 算法[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2003, 18(2): 233 ~ 239.
Wang Tong, Gu Chuangang, Yang Bo, et al. PISO algorithm for unsteady flow field [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2003, 18(2): 233 ~ 239. (in Chinese)
 - 11 Shi F, Tsukamoto H. Numerical study of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser interaction in a diffuser pump stage [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(3): 466 ~ 474.

(上接第 42 页)

- 5 You-teak Kim, Kazuhiro Tanaka, Yoichiro Matsumoto. Tipclearance and bubble size of a screw-type centrifugal pump operating in two-phase flow[C] // Proceeding of ASME, 1999(7): 519 ~ 526.
- 6 裴吉, 袁寿其, 袁建平. 流固耦合作用对离心泵内部流场影响的数值计算[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 107 ~ 112.
Pei Ji, Yuan Shouqi, Yuan Jianping. Numerical calculation for effect of fluid and structure interaction on flow field in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 107 ~ 112. (in Chinese)
- 7 Benra F K, Dohmen H J. Comparison of pump impeller orbit curves obtained by measurement and FSI simulation[C] // ASME PVP2007-26149, 2007, 4: 41 ~ 48.
- 8 Kato C, Yamade Y, Wang Hong, et al. Prediction of the noise from a multi-stage centrifugal pump[C] // ASME FEDSM2005, 2005, 1(Part B): 1 273 ~ 1 280.
- 9 王洋, 王洪玉, 徐小敏, 等. 冲压焊接离心泵叶轮有限元计算[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 109 ~ 113.
Wang Yang, Wang Hongyu, Xu Xiaomin, et al. Finite element computation for impeller of stamping and welding centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 109 ~ 113. (in Chinese)
- 10 Jiang Y Y, Yoshimura S, Imai R, et al. Quantitative evaluation of flow-induced structural vibration and noise in turbo machinery by full-scale weakly coupled simulation[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(4): 531 ~ 544.
- 11 Yang J, Preidikman S, Balaras E. A strongly coupled, embedded-boundary method for fluid-structure interactions of elastically mounted rigid bodies[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(2): 167 ~ 182.
- 12 张金凤, 徐宇平, 袁寿其, 等. 双叶片螺旋离心泵非定常压力脉动数值分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 102 ~ 106.
Zhang Jinfeng, Xu Yuping, Yuan Shouqi, et al. Numerical analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in double blade screw type centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 102 ~ 106. (in Chinese)